نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۶۷-۱۵۵

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 155-167

استفاده از روش بینایی استریو به‌منظور طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی

افشین عزیزی[۱]، یوسف عباسپور گیلانده[۲]*، ترحم مصری گندشمین[۳]، حمید ابریشمی مقدم[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۸

چکیده

سطح یک خاک خاک‌ورزی شده مملو از خاک‌دانه‌ها و کلوخه‌هایی است که دارای اندازه‌های مختلف می‌باشند به گونه‌ای‌که اندازه آن‌ها از نظر کیفیت خاک‌ورزی و میزان مصرف انرژی در آماده‌سازی بستر بذر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در این پژوهش طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از خاک‌ورزی از طریق بینایی استریو بر اساس طول، عرض و ارتفاع آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. از بین این ابعاد، محاسبه ارتفاع (ضخامت) کلوخه‌ها همواره با چالش روبه‌رو بوده است؛ چرا که محاسبه آن که در اصطلاح پردازش تصویر به عمق تصویر معروف است، با یک تصویر تکی غیرممکن و یا بسیار سخت می‌باشد که برای این به سه‌بعدی‌سازی تصویر نیاز است. در این مطالعه یک مجموعه داده تصاویر استریو از سطح خاک در زمین زراعی تهیه گردید. تعداد این زوج تصاویر استریو برابر ۳۱۲ جفت بود که برای بازسازی سه‌بعدی آن‌ها به‌ترتیب عملیات کالیبراسیون، استخراج نقاط کلیدی از زوج تصاویر استریو، تطابق نقاط یافته شده و محاسبه مدل ابر نقطه‌ای روی آن‌ها انجام پذیرفت و تصاویر به شکل سه‌بعدی درآمدند. با به‌دست آمدن تصویر سه‌بعدی ارتفاع کلوخه‌ها محاسبه شدند و نهایتاً با در اختیار داشتن این اطلاعات و نیز استفاده از مدل تحلیل تمییزی به‌عنوان یک دسته‌بند خطی، کلوخه‌ها با اندازه‌های گوناگون طبقه‌بندی شدند. بالاترین دقت طبقه‌بندی ۹۶/۲٪ و نیز دقت کلی طبقه‌بندی برابر ۸۳/۷٪ به‌دست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد رویکرد بینایی استریو می‌تواند با تعیین ابعاد کلوخه‌ها به‌ویژه ارتفاع آن‌ها در کیفیت‌سنجی عملیات خاکورزی به‌صورت رضایت‌بخشی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بینایی استریو، خاک‌ورزی، قطر متوسط وزنی، کلوخه

مقدمه

بدون شک یکی از موثرترین ابزار بشر در درک جهان و شناخت آن، حس بینایی است. درک خصوصیات سه‌بعدی یک منظره و یافتن اطلاعات هندسی اجسام موجود در آن، از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در بینایی ماشین و کامپیوتر به‌شمار می‌آید (Faraji-Mahyari and Rafiee, 2016).

در بخش کشاورزی تمرکز بر روش‌های بهبود وضعیت فیزیکی، ساختاری و شیمیایی و نیز روش‌های کنترل و پایش وضعیت خاک از زمان آماده‌سازی بستر بذر تا برداشت محصول، همواره از عمده‌ترین اهداف و جهت‌گیری‌ها در ارتقاء راندمان تولید بوده و در صدر اولویت‌های تحقیقاتی با هدف افزایش عملکرد قرار داشته‌است (Piers *et al.*, 2011; Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016).

به‌طور کلی پیاده‌سازی عملیات خاک‌ورزی همواره با صرف انرژی زیادی همراه است که در اغلب موارد این میزان از پنجاه درصد کل انرژی صرف شده برای آماده‌سازی زمین نیز فراتر می‌رود، پرداختن به موضوع خاک‌ورزی مورد توجه کشاورزان، کارشناسان و دست‌اندرکاران این بخش قرار گرفته است (Bogrekci and Godwin, 2007). چنانچه خاکی که تحت عملیات خاک‌ورزی قرار گرفته و به شکل دانه‌ای درآمده است از نظر اندازه کلوخه‌ها در وضعیت خوبی قرار داشته باشد، مزیت‌هایی از قبیل نفوذپذیری کافی آب و هوا، مقاومت در برابر فرسایش آبی و بادی و نهایتاً رشد مناسب گیاه و رسیدن به عملکرد قابل قبول را به دنبال خواهد داشت (Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016). بنابراین اندازه کلوخه‌ها (خاک‌دانه‌های بزرگ) بایستی در یک رنج استاندارد بوده و کوچکتر و یا بزرگتر از حد قابل قبول نباشند، زیرا در غیر این صورت با پایین آمدن کیفیت شخم، دوباره‌کاری و اتلاف انرژی را در پی خواهد داشت. راه حل این چالش، پایش بلادرنگ عملیات شخم‌زنی به‌ویژه از نظر اندازه‌ی کلوخه‌ها می‌باشد به‌طوری‌که اپراتور بتواند با داشتن اطلاعات دقیق از وضعیت خاک‌دانه‌ها اقدام مناسب را در زمان نیاز مانند تغییر پارامترهای خاک‌ورزی، انجام دهد.

یکی از روش‌های متداول در اندازه‌گیری اندازه کلوخه‌ها شاخص میانگین وزنی قطر[۵] است. در روش‌های رایج اصول کلی بر الک

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۴- استاد، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: abbaspour@uma.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.v10i2.82853

5- Mean weight diameter

کردن نمونه‌های خاک استوار است به گونه‌ای که نمونه‌های جمع‌آوری شده بر روی یک سری الک‌هایی با سایز مش متفاوت قرار می‌گیرند و بر اساس میزان عبور خاک از هر الک و وزن باقیمانده روی آن، شاخص میانگین وزنی قطر برای آن نمونه تعیین می‌شود که مطالعات زیادی در این زمینه توسط محققان انجام گرفته است (Chepil and Bisal, 1943; Van Bavel, 1949; Cemper and Chepil, 1965; Lyles *et al.*, 1970; Kemper *et al.*, 1985; Nasr and Selles, 1995). روشن است که در مقیاس‌های بزرگتر و کاربردهای عملی، اندازه‌گیری قطر کلوخه‌ها از طریق الک‌های واقعی راندمان کافی را نداشته و مقرون به صرفه نیست. این تنها محدودیت روش الک نیست بلکه کندی و زمان‌بر بودن آن، احتمال متلاشی شدن نمونه‌ها قبل از قرارگیری بر روی الک‌ها، نیاز به نمونه‌برداری‌های متعدد و نیز چسبیدن خاک به ابزار مورد استفاده از دیگر چالش‌های روش مذکور است (Czachor and Lipiec, 2004). گذشته از این موارد، پیاده‌سازی روش الک با دقت و ظرافت خاص، نیازمند صرف زمان و انرژی زیاد و همچین سختی کار می‌شود (Stafford and Amber, 1990). دلیل این امر آن است که روش الک وابستگی بیش از اندازه‌ای به شرایط نمونه‌ها، نوع ابزار و عوامل دیگر دارد به‌طوری‌که نمی‌تواند به‌صورت مقاوم و مستقل از عوامل یاد شده عمل نماید و این چیزی نیست که به‌راحتی آن را نادیده گرفت. بنابراین محققان به توسعه‌ی روش‌های جایگزین مانند الک مجازی که غیرتماسی هستند روی آورده‌اند (Sandri *et al.*, 1998; Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016).

در سال‌های اخیر با گسترش ادوات الکترونیکی و افزایش سرعت و حافظه کامپیوترها شاهد استفاده هرچه بیشتر از تصاویر دیجیتال و نیز شاخه‌های مختلف علم هوش مصنوعی به نام هوش محاسباتی در عرصه‌های مختلف مانند پزشکی، صنایع دفاعی و هوا و فضا، سنجش از دور، کشاورزی و غیره هستیم (Zhang and Dahu, 2019). یک تصویر دیجیتال در حقیقت یک سیگنال دو بعدی از مکان می‌باشد که عناصر سازنده آن به نام پیکسل، شدت روشنایی صحنه‌ای که از آن عکس گرفته شده است را نشان می‌دهند.

در تمامی روش‌های مبتنی بر پردازش تصاویر تکی، یک سری ویژگی‌ها از تصاویر دیجیتال اخذ شده استخراج می‌گردند و سپس بر اساس تحلیل آن‌ها، اندازه خاک‌دانه‌های مختلف تخمین زده می‌شود. چنین روش‌هایی همواره دو مشکل اساسی دارند. یکی این است که از نقطه نظر ریاضی امکان بازسازی یک صحنه فقط از یک زاویه دید وجود ندارد بلکه برای بازسازی کامل یک شئ در یک صحنه بایستی ۳۶۰ تصویر به‌ازای هر یک درجه وجود داشته باشد که فراهم آوردن این تعداد تصویر از یک صحنه کاری بس سخت و البته غیرهوشمندانه است. با این وجود، توسعه‌دهندگان بینایی استریو با دو تصویر اقدام به تخمین و بازسازی می‌کنند (Hartley and Zisserman, 2003). مشکل دوم به محدودیت ذاتی ادوات تصویربرداری برمی‌گردد و آن این است که اساساً در هنگام اخذ تصویر عملاً بعد سوم که همان ارتفاع یا عمق تصویر باشد، در فرآیند تصویربرداری از دست می‌رود. زیرا یک تصویر ماهیتاً یک سیگنال دو بعدی (شامل بعد طول و عرض) می‌باشد و در نتیجه امکان تخصیص عنصر تصویر (پیکسل) به این بعد سوم وجود ندارد. به همین دلیل بایستی با تکنیک‌های خاص این بعد از دست رفته را بازیابی نمود.

یکی دیگر از روش‌های رایانه‌ای که برای آشکارسازی و تعیین اندازه خاک‌دانه‌ها استفاده می‌شود، تکنیک مدل دیجیتالی ارتفاع[1] است. در این روش محققان از این تصاویر که معمولاً به‌صورت اسکن شده با ابزار مخصوص از سطح خاک گرفته شده‌اند استفاده کرده و ویژگی‌هایی از قبیل موقعیت و مرز کلوخه‌ها را بدون محاسبه پارامترهای متداول پردازش تصویر مانند شاخصه‌های رنگی، شکلی و بافتی استخراج می‌نمایند (Taconet and Ciarletti, 2007; Vannier *et al.*, 2009; Chimi-Chiadjeu *et al.*, 2011, 2014). شاخصه اصلی این نوع تصاویر این است که پیکسل‌های تصویر در زمان عکس‌برداری در راستای ارتفاع نیز دارای مقدار هستند؛ بدین معنی که مقادیر هر پیکسل علاوه بر دو مؤلفه افقی و عمودی، میزان ارتفاع را نیز نشان می‌دهد (Taconet *et al.*, 2013). با استفاده از این خصوصیت ضمن آشکارسازی موقعیت کلوخه‌ها و مرز آن‌ها، تخمینی از میکروتوپوگرافی خاک نیز به‌دست می‌آید که پارامتر بسیار مهمی در خاک‌ورزی از نظر فرسایش، رابطه آب و خاک، نفوذپذیری و بسیاری از فرآیندهای سطح خاک که در مقیاس میلی‌متر روی می‌دهند می‌باشد. می‌توان گفت حسن اصلی این روش دقت زیاد و نیز بازسازی سه‌بعدی کلوخه‌ها می‌باشد اما نیاز به امکانات سطح بالا و محدودیت در کاربردهای بلادرنگ از مشکلات این روش می‌باشند.

دسته دیگری از روش‌ها برای تحلیل کیفیت شخم و تعیین رنج استاندارد خاک‌دانه‌ها از تکنیک‌های هوش محاسباتی استفاده می‌کنند. به‌عنوان نمونه طی یک مطالعه پیش‌بینی خردشدگی خاک با استفاده از روش منطق فازی مورد بررسی قرار گرفت. محققان این در این مطالعه با در نظر گرفتن عوامل مختلف در فرآیند خردشدگی، تعداد ۵۰ قانون برای ایجاد مدل فازی نوشتند و توانستند توزیع خاک‌دانه‌ها را با دقت نسبتاً مناسبی مدل‌سازی نمایند (Abbaspour and Sedghi, 2015). ولی در عین حال سیستم پیشنهاد شده دارای محدودیت‌هایی از جمله عدم به‌کارگیری در شرایط زمان–واقعی بود.

برای غلبه بر چالش‌های فوق، می‌توان از بینایی استریو کمک گرفت که در آن با استفاده از الگوریتم‌های استخراج‌کننده ویژگی از هر تصویر و تطابق آن‌ها با یکدیگر و ادغام زوج تصویر، اشیاء به‌صورت سه‌بعدی بازسازی می‌شوند (Nasiri *et al.*, 2017). از این

1- Digital Elevation Model

رو می‌توان ضمن تعیین موقعیت سه‌بعدی کلوخه‌ها ابعاد کامل آن‌ها را به‌درستی در مختصات (x, y, z) سنجید. می‌توان گفت بینایی استریو روشی نو ظهور است که از سیستم بینایی انسان الهام گرفته شده است و مختصات سه‌بعدی اجسام را با استفاده از تصاویر دوربین‌های چپ و راست و معادلات زیر استریو محاسبه می‌کند. در کاربردهای رباتیک، استفاده از این روش سبب می‌شود تا ربات اطلاعاتی از ساختار و شکل هندسی اجسام و مکان آن‌ها، هم نسبت به ربات و هم نسبت به اجسام دیگر، به‌دست آورد (Faraji-Mahyari and Rafiee, 2016).

هدف از بینایی استریو[1] بازیابی اطلاعات عمق صحنه از روی دو و یا چند تصویر دریافت شده از آن توسط دوربین‌هایی با پارامترهای معلوم (کالیبره) می‌باشد به‌طوری‌که استفاه از این رویکرد در حوزه‌های مختلف روز به روز در حال افزایش یافتن است (Sankowski *et al.*, 2017). در ادامه به چند نمونه از کاربردهای بینایی استریو در بخش کشاورزی اشاره می‌شود.

طی یک مطالعه‌ی میدانی (Kise *et al.*, 2005) از تکنیک بینایی استریو برای آشکارسازی ردیف‌های کشت استفاده کردند. این پژوهش با هدف هدایت خودکار تراکتور انجام گرفت که در آن ضمن به‌دست آوردن نقشه سه‌بعدی ارتفاع، نقطه بهینه ناوبری در مرکز ردیف‌های کشت یافته شد و هدایت وسیله نقلیه نیز بر این اساس صورت پذیرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که پردازش تصاویر استریو یک روش مطمئن برای هدایت خودکار تراکتور در ردیف‌های کشت توأم با علف‌های هرز می‌باشد. در یکی از مطالعات، پژوهش‌گران یک سیستم مبتنی بر بینایی استریو برای تولید نقشه ناهمخوانی[2] درخت به‌منظور تحلیل مشخصات هندسی درختان توسعه دادند. در این مطالعه اشکال هندسی و نیز تراکم شاخ و برگ با استفاده از الگوریتم‌های سراسری و محلی در راستای تطابق زوج تصاویر استریو مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آن‌ها حاکی از مفید و مقاوم بودن الگوریتم ارائه شده برای درختان واقعی در شرایط طبیعی بود (Jafari-Malekabadi, 2019). در تحقیق دیگری نیز، محققان با روش مشابهی به تحلیل محصولات کشاورزی از حیث پایش محصول در طول مدت رشد، برداشت، طبقه‌بندی و سایر عملیاتی که در بخش کشاورزی برای محصولات زراعی و باغی انجام می‌شود پرداختند. آن‌ها ضمن اشاره به محدودیت‌های روش‌های دوبعدی، قابلیت‌های روش بینایی استریو را تشریح کرده و در این راستا بر روی کاربرد این روش در بازسازی سه‌بعدی بافت چند گیاه با وضوح بسیار بالا و نیز اندازه‌گیری و درجه‌بندی محصول سیب‌زمینی به تحقیق پرداختند و گزارش نمودند که تصاویر سه‌بعدی اطلاعات غنی برای بیشتر کاربردها در بخش کشاورزی در اختیار کارشناسان و کشاورزان قرار می‌دهد (Neal-Smith *et al.*, 2018).

در یک مطالعه در زمینه خاک‌ورزی، محققان با استفاده از روش بینایی استریو اقدام به تولید نقشه‌های سه‌بعدی از سطح خاک نمودند و توانستند شیب سطح خاک و نیز تغییرات حجم پروفیل خاک را قبل و بعد از خاک‌ورزی مورد سنجش و ارزیابی قرار دهند (Riegler *et al.*, 2014). این محققان با ارتباط دادن این دو پارامتر به کیفیت عملیات خاک‌ورزی، گزارشی از پتانسیل بالقوه تکنیک‌های مبتنی بر بینایی استریو در اندازه‌گیری سایر پدیده‌های فیزیکی به‌وجود آمده در سطح خاک‌های زراعی دادند. در مطالعه‌ای دیگر از یک نوع حسگر به نام Xtion Pro برای اندازه‌گیری میزان پستی و بلندی سطح خاک استفاده استفاده شد (Thomsen *et al.*, 2015). پژوهش‌گران این مطالعه از روش استریو فتوگرامتری در ساخت این حسگر استفاده کردند. سادگی و هزینه نسبتاً کم این روش از جمله مزایای آن گزارش شده است اما در عین حال دقت به اندازه روش‌های مبتنی بر بینایی استریو و اسکنر لیزری نمی‌باشد. روش دیگر برای ساخت مدل سه‌بعدی رویکرد فتوگرامتری می‌باشد که در آن از تصاویر فتوگرافیک[3] برای تعیین شکل و موقعیت اشیاء استفاده می‌شود. از این روش برای تخمین میزان پستی و بلندی سطح خاک ناشی از عملیات خاک‌ورزی نیز استفاده شده است (Gilliot *et al.*, 2017). با توجه موارد ذکر شده و محدودیت‌های روش‌های قبلی از نقطه نظر دقت، سرعت و سهولت پیاده‌سازی هدف از این مطالعه، ارائه یک تکنیک مبتنی بر بینایی استریو به‌منظور تعیین ابعاد کلوخه‌های حاصل از شخم و ارزیابی کیفیت شخم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت زمین شخم‌خورده

عملیات شخم و نمونه‌برداری از خاک در مزرعه آموزشی- تحقیقاتی بابلان دانشگاه محقق اردبیلی واقع در ۱۰ کیلومتری شهر اردبیل در تابستان سال ۱۳۹۷ انجام شد. میزان رطوبت خاک در زمان شخم برابر ۸٪ در زمینی با بقایای گندم بود. خاک این مزرعه دارای بافت لومی- شنی شامل به‌ترتیب ۵۴٪ شن، ۳۲٪ سیلت و ۱۴٪ رس بود. به منظور حفظ یکنواختی مزرعه و این‌که شرایط فیزیکی یکسانی برای تمامی کلوخه‌های به‌وجود آمده در سطح مزرعه وجود داشته باشد، کل مزرعه توسط گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شد و در ادامه با تقسیم‌بندی زمین به کرت‌هایی با ابعاد مشخص، برای دستیابی به دامنه مناسب کلوخه‌ها از دو نوع ادوات خاک‌ورز شامل روتیواتو و دیسک بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی[4]، استفاده شد تا

1- Stereo vision
2- Disparity map
3- Photographic images
4- Randomized Complete Block Design

تلفیقی از ماشین‌های مورد استفاده در خاک‌ورزی اولیه و ثانویه به‌کار رفته باشد. هدف از انتخاب طرح بلوک‌های کامل تصادفی کنترل تغییرات در آزمایشات مزرعه‌ای و همچنین رعایت اسلوب استاندارد در پیاده‌سازی عملیات کشاورزی بود تا کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی در چارچوب شناخته‌شده‌ای به‌دست آیند. پارامترهای تأثیرگذار در عملیات خاک‌ورزی سرعت پیشروی، موقعیت درپوش روتیواتور و تعداد دفعات استفاده از ماشین انتخاب شدند. تنظیم این پارامترها به این صورت بود که برای سرعت پیشروی سه سطح سرعت شامل دنده یک سنگین، دنده دو سبک و دنده سه سبک به‌ترتیب برابر ۲/۳، ۳/۳ و ۵/۲ کیلومتر بر ساعت، برای درپوش روتیواتور دو حالت بالا و پایین و برای پارامتر آخر تعداد دفعات استفاده بین یک تا سه بار در نظر گرفته شد. تعداد کلاس‌های مورد نیز نظر از نظر اندازه کلوخه برابر ۶ در نظر گرفته شد که اندازه هر کدام از آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- رنج میانگین وزنی قطر کلوخه‌های مختلف پس از عملیات شخم (مقادیر به میلی‌متر هستند)

Table 1- The mean range of different clod MWD obtained from standard mechanical sieves (mm)

کلاس ۱ Class 1	کلاس ۲ Class 2	کلاس ۳ Class 3	کلاس ٤ Class 4	کلاس ٥ Class 5	کلاس ٦ Class 6
$d \leq 7$	$9 < d < 33.2$	$28.4 < d < 64.5$	$61.8 < d < 81.2$	$70.4 < d < 104$	$d \geq 100$

اخذ تصاویر

در آماده کردن مجموعه داده هدف این بود که این کار در شرایط واقعی و نه در محیط ایزوله و تحت کنترل آزمایشگاه انجام گیرد، لذا برای حصول این هدف از تصاویر استریو استفاده شد. به‌طور کلی تصاویر دوربین‌های استریو دو مزیت را دارا هستند که یکی عدم وابستگی زوج تصاویر استریو به تغییرات نور محیط می‌باشد به‌طوری‌که تصویربرداری ما در شرایط واقعی مزرعه و بدون نورپردازی خاصی در روزهای آفتابی و ابری انجام گرفت که این یک مزیت بسیار مهم می‌باشد. این ویژگی مثبت حداقل از ۳۰٪ پردازش اضافی در پروسه‌ی بینایی ماشین جلوگیری به عمل می‌آورد. ویژگی مثبت دوم این است که دوربین‌های استریو به دلیل داشتن میدان دید[1] زیادتر، تصاویری که تولید می‌کنند دارای انسداد[2] پایین‌تری می‌باشند که این امر در اخذ تصاویر با اطلاعات بیشتر مؤثر است. شایان ذکر است که شرایط تصویربرداری برای هر دو تصویر استریو یکسان می‌باشد. در این پژوهش از دوربین استریو ساخت شرکت Fujifilm مدل W3 مجهز به دو حسگر CCD با رزولوشن ۱۰ مگاپیکسل برای هر دو لنز چپ و راست، فاصله خط مبنا ۷/۵ سانتی‌متر و فاصله کانونی ۱۲ میلی‌متر استفاده گردید. فاصله لنزهای دوربین از سطح زمین برابر ۶۰ سانتی‌متر تعیین شد (Rahimi-Ajdadi *et al.*, 2016). شکل ۱ نمایش ساده‌ای از مکانیزم اخذ تصویر توسط دوربین استریو را نشان می‌دهد که در آن خطوط گذرنده از مرکز دو دوربین موازی هم هستند. تعداد کل تصاویر برابر ۳۱۲ زوج تصویر استریو با وضوح تصویر 3648×2736 بود که نمونه‌ای از این داده‌های تصویری در شکل ۲ نشان داده شده است.

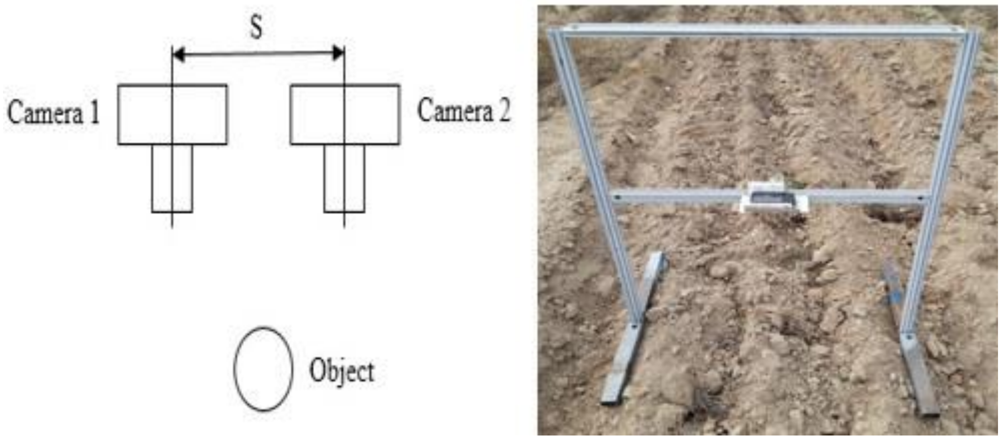
کالیبره کردن و یک‌سوسازی تصاویر

الگوریتم استریو شامل چهار مرحله اصلی کالیبراسیون، یکسوسازی، تناظریابی و مثلث‌سازی است. در این بین دقت سه‌بعدی‌سازی تا حد زیادی به کالیبراسیون و تناظریابی وابسته است. کالیبراسیون، فرآیند مدل‌سازی پارامترهای دوربین و تناظریابی، فرآیند جفت‌سازی نقاط بر اساس شباهت آن‌ها است. مثلث‌سازی نیز متداول‌ترین روش برای عمق‌یابی در صورت داشتن نقاط متناظر است (Faraji-Mahyari and Rafiee, 2016). به منظور کاهش زمان کالیبراسیون و نیز پردازش‌های بعدی، اندازه تمامی تصاویر به ۹۱۲× ۶۸۴ پیکسل به‌عنوان تنها عملیات پیش‌پردازش تغییر یافت. بدین منظور، زوج تصاویر استریو با استفاده از الگوی منظم صفحه شطرنجی و با استفاده از جعبه ابزار Stereo Camera Calibrator نرم‌افزار متلب کالیبره گردیدند (Stereo Calibrator Toolbox, MATLAB, R2018a). پس از کالیبراسیون نوبت به یک‌سوسازی[3] زوج تصاویر رسید که در آن هر دو تصویر در یک راستا قرار گرفتند تا ویژگی‌های استخراجی در مرحله بعد کمترین انحراف را در بین دو تصویر چپ و راست باهم داشته باشند (Loop and Zhang, 1999).

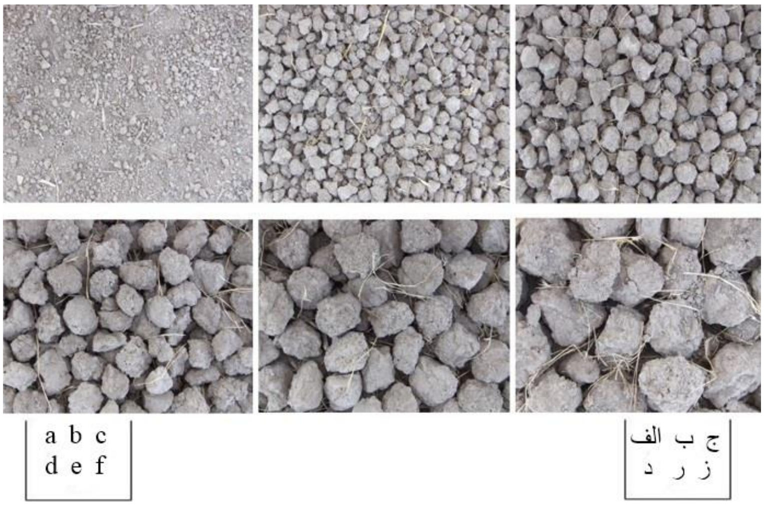
استخراج نقاط کلیدی

به‌منظور استخراج نقاط کلیدی به‌عنوان ویژگی‌های تأثیرگذار در زوج تصاویر استریو از الگوریتم SIFT استفاده شد. این الگوریتم به دنبال استخراج نقاط کلیدی به‌عنوان ویژگی‌های تکرارپذیر و قابل قبول بر اساس فضای مقیاس می‌گردد (Lindeberg, 1994). ویژگی بارز این الگوریتم عدم وابستگی آن به چرخش و مقیاس و نیز مقاومت در برابر اعوجاجات همگر[4]، نویز و تغییرات روشنایی می‌باشد (Lowe, 2004).

1- Field of view
2- Occlusion
3- Rectification
4. Affine



شکل ۱– شکل شماتیک به همراه تجهیزات تصویربرداری استریو
Fig.1. Schematic of the stereo imaging with its setup



شکل ۲– نمونه‌ای از تصویر لنز چپ دوربین استریو از شش کلاس موجود: تصاویر به‌ترتیب از کوچک‌ترین خاک‌دانه (الف؛ ردیف بالا گوشه چپ) تا درشت‌ترین آن‌ها (ز؛ ردیف پایین گوشه راست) نمایش داده شده‌اند.
Fig.2. The aggregates after tillage operation: The aggregate size distribution is increased from Class a to class f.

الگوریتم SIFT در چهار مرحله اقدام به استخراج ویژگی می‌نماید که عبارتند از: مقیاس تشخیص فضای اکسترمم[۱]، تعیین دقیق نقطه کلیدی[۲]، واگذاری گرایش نقطه کلیدی[۳] و توصیف‌گرهای نقطه کلیدی[۴]. پیاده‌سازی الگوریتم SIFT و استخراج نقاط کلیدی و نیز تطابق آن‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python و کتابخانه Numpy انجام گرفت.

مقیاس تشخیص فضای اکسترمم

الگوریتم SIFT کار خود را با یافتن نواحی بالقوه نقاط کلیدی که نسبت به مشخصات هندسی و تغییرات در مقیاس تصویر ثابت می‌مانند شروع می‌کند. بدین منظور تصویر باید به‌صورت هم‌زمان در چند مقیاس در نظر گرفته شده و سپس اکسترمم (بیشینه یا کمینه) در درون این تصاویر مقیاس داده شده پیدا شوند. به عبارت دیگر، جستجو در یک فضای مقیاس تفاضل گاوسی[۵] که حاوی تمامی مقیاس‌های ممکن تصویر است انجام می‌گیرد. برای به‌دست آوردن فضای مقیاس، تصویر مورد نظر با یک فیلتر نرم‌کننده گوسی به‌صورت رابطه‌ی (۱) در هم آمیخته می‌شود:

$$L(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) * I(x,y) \quad (۱)$$

که در آن $G(x,y,\sigma)$ تابع گوسین است که به‌صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

1- Scale-space extrema detection
2- Keypoint localization
3- Orientation assignment
4- Keypoint descriptor

5- Difference of Gaussian

$$G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (۲)$$

برای یافتن مکان‌های بالقوه و باثبات نقطه کلیدی به توابع تفاضل گاوسی میان فضاهای مختلف مقیاس از رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود.

$$D(x,y,\sigma) = L(x,y,k\sigma) - L(x,y,\sigma) \quad (۳)$$

برای آشکارسازی نقاط کلیدی یا اکسترمم، تصاویر تفاضل گاوسی بررسی شده و نقاطی انتخاب می‌شوند که بزرگ‌تر (و یا کمتر) از تمام همسایه‌ها در زمینه مقیاس جاری و مقیاس همسایگی (اکتاوهای) بالا و پایین هستند. این همسایگی‌ها به همسایگی سه طبقه Moore neighborhood موسوم هستند (Gardel-Kurka and Diaz-Salazar, 2019).

در عمل تعیین موقعیت و مقیاس نقطه کلیدی از روی نقطه مرکزی به نتیجه چندان دقیقی منتهی نمی‌شود و باید نقاط با کنتراست پایین و نقاط لبه غیر دقیق کنار گذاشته شوند. برای این کار محل نقطه کلیدی توسط بسط تیلور درجه دوم تابع تفاضل گاوسی و درون‌یابی بیشینه/کمینه مدل‌سازی می‌شوند که برای یک نقطه نمونه با مختصات $x^T = [x, y, \sigma]$ بسط به‌صورت رابطه (۴) است:

$$D(x) = D + \left(\frac{\partial D}{\partial x}\right)^T x + \frac{1}{2} x^T \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} x \quad (۴)$$

که مقدار بهینه انحراف این نقطه با کمینه‌سازی رابطه (۴) به شکل رابطه (۵) به‌دست می‌آید:

$$\hat{x} = -\left(\frac{\partial^2 D}{\partial x^2}\right)^{-1} \frac{\partial D}{\partial x} \quad (۵)$$

واگذاری گرایش نقطه کلیدی

علاوه بر داشتن ویژگی‌های با مقیاس ثابت، نیاز به در اختیار داشتن ویژگی‌های با دوران ثابت نیز وجود دارد. برای این منظور، اقدام به واگذاری یا تخصیص هر ویژگی به یک گرایش[1] خاص می‌نماییم. گرایش هر نقطه کلیدی از طریق گرادیان‌های محلی تصویر هموار شده L در همان مقیاس اولیه محاسبه می‌شود. گرادیان‌های محلی و نیز مقدار گرایش برای هر تصویر نمونه از طریق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند:

$$M(x,y) = \sqrt{(L(x+1,y) - L(x-1,y))^2 + (L(x,y+1) - L(x,y-1))^2} \quad (۶)$$

$$\theta(x,y) = arctan\left(\frac{L(x,y+1) - L(x,y-1)}{L(x+1,y) - L(x-1,y)}\right) \quad (۷)$$

با جمع‌آوری هیستوگرام‌های گرایشی که یک بردار حاوی ۳۶ مؤلفه که هر کدام متناظر °۱۰ هستند و محاسبه بالاترین پیک برای هر نقطه، گرایش نهایی نقطه کلیدی به‌دست می‌آید (Gardel-Kurka and Diaz-Salazar, 2019).

توصیف‌گرهای نقطه کلیدی

آخرین گام در استخراج یک نقطه کلیدی، توصیف ناحیه حول نقطه کلیدی است به‌گونه‌ای‌که بتوان آن را با نقطه‌های کلیدی دیگر مقایسه نمود. به عبارت بهتر، توصیف‌گر نقطه کلیدی، نواحی محلی را تعریف می‌کند که نسبت به مقیاس، دوران و تغییرات روشنایی ثابت باشند. برای این کار از تصویر مات شده در نزدیک‌ترین مقیاس استفاده شده و از نقاط حول نقطه کلیدی نمونه‌برداری کرده و گرادیان و گرایش آن‌ها را مقایسه می‌کنیم. سپس تصویر را در گرایش نقطه کلیدی دوران می‌دهیم به‌طوری‌که گرایش‌ها با توجه به گرایش نقطه کلیدی نرمال شوند. توصیف‌گر به‌دست آمده در اصل، یک ماتریس مربعی (با چهار زیرناحیه) می‌باشد که المان‌های آن اندازه هشت هیستوگرام وزن‌دار هستند.

تطابق ویژگی‌های یافت‌شده

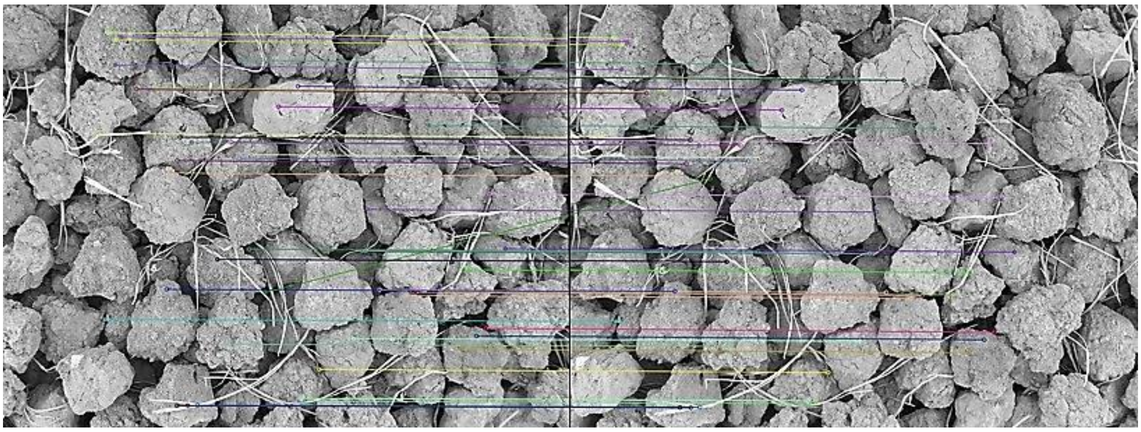
در سامانه‌های بینایی استریو برای تخمین مختصات نقاط اجسام لازم است که تصاویر چپ و راست با یکدیگر تطبیق داده شوند به‌طوری‌که این تطبیق‌دهی از گام‌های مهم در الگوریتم‌های مبتنی بر بینایی استریو است و مستقیماً دقت بازسازی مدل سه‌بعدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Trucco and Verri, 1998). تطبیق‌دهی عبارت از تعیین نقاط کلیدی متناظر در زوج تصویر استریو می‌باشد که این نقاط متناظر در بازسازی سه‌بعدی اجسام مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه از الگوریتم Brute Force به‌منظور تطبیق‌دهی توصیف‌گرهای متناظر آشکارشده در بین زوج تصویر استریو استفاده شد. این الگوریتم معیار تطبیق‌دهی را فاصله اقلیدسی در نظر می‌گیرد؛ بدین‌گونه که کمترین فاصله بین توصیف‌گرها بهترین تطبیق‌ها را نتیجه می‌دهد. نتایج بصری تطبیق در شکل ۳ نشان داده شده است که در آن ۵۰ توصیف‌گر تطبیق داده شده توسط خطوطی متناظر شده‌اند.

مدل ابر نقطه‌ای

پس از به‌دست آمدن موقعیت سه‌بعدی کلوخه‌ها در تصویر، مدل ابر نقطه‌ای به‌عنوان یک نمایش سه‌بعدی از صحنه می‌باشد به‌دست می‌آید. مدل ابر نقطه‌ای مجموعه‌ای سه‌بعدی از نقاط است که خصوصیات سطح خارجی شئ را توصیف کرده و برای بازسازی مدل سه‌بعدی نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل مختصات سه‌گانه (x,y,z) تمامی کلوخه‌ها در یک فضای سه‌بعدی مشخص هستند به‌طوری‌که تمامی نقاط در این مدل حاوی اطلاعات سه‌بعدی از موقعیت کلوخه‌ها می‌باشند. در مدل ابر نقطه‌ای به‌دست آمده، میانگین مؤلفه ارتفاع تمامی نقاط (که تعدادشان برای هر مدل مشخص است) در راستای محور z به‌عنوان ضخامت کلوخه‌ها در هر شش کلاس مورد نظر در نظر گرفته شد. از آن‌جایی‌که در هر تصویر تمامی کلوخه‌ها با توجه به اندازه آن‌ها پس از الک کردن در کلاس

1- Orientation

مشخص خود قرار داشتند لذا میزان ارتفاع (بالاآمدگی) همه نمونه‌ها در یک کلاس معین تقریباً در یک سطح بود؛ به‌طوری‌که این میزان برای یک کلاس با بقیه کلاس‌ها تفاوت داشت. مبنای این محاسبه نیز سطح صاف عاری از هر گونه کلوخه بود در نظر گرفته شد تا شرایط برای محاسبه ارتفاع نمونه‌ها از روی مدل ابر نقطه‌ای یکسان باشد. مسأله هم‌پوشانی کلوخه‌ها تأثیری در محاسبه مقدار ضخامت (ارتفاع) کلوخه‌ها نداشت اما در اندازه‌گیری طول و عرض آن‌ها به‌دلیل تورفتگی نمونه‌ها، تأثیرگذار بود. دلیل استفاده از رویکرد بینایی استریو در این مطالعه دقیقاً به همین موضوع برمی‌گردد. برای نمایش مدل ابر نقطه‌ای به شکل سه‌بعدی از نرم‌افزار Agisoft Metashape Professional استفاده شد.



شکل ۳- نمایش توصیف‌گرهای تطبیقی توسط الگوریتم Brute Force

Fig.3. Illustration of adaptive descriptors using Brute Force algorithm

طبقه‌بند با آنالیز تفکیک خطی

پس از به‌دست آمدن مقادیر ارتفاع کلوخه‌ها در هر شش دسته از مدل آنالیز تفکیک خطی[1] که یک جداساز خطی می‌باشد به منظور طبقه‌بندی تصاویر استفاده گردید. ورودی این مدل بردارهای حاوی مقادیر ارتفاع بودند که این مدل با یافتن تابع خطی مناسب احتمال تخصیص هر کدام از مشاهدات را به گروه یا دسته مربوطه حداکثر می‌کند. این کار با یافتن معادلات رگرسیونی متناسب برای هر گروه که ضرایب آن از طریق مقادیر استاندارد شده توابع مربوطه از روی ویژگی‌ها استخراج می‌شود، انجام می‌گیرد. برای جداسازی تعداد پنج تابع در نظر گرفته شد. ویژگی بارز مدل آنالیز تفکیک، سادگی و خطی بودن آن می‌باشد. پیاده‌سازی طبقه‌بند آنالیز تفکیک توسط نرم‌افزار SPSS18 انجام شد.

در این مطالعه به‌منظور در اختیار داشتن معیاری از عملکرد طبقه‌بندی توسط مدل سه‌بعدی ارائه شده از ماتریس درهم ریختگی استفاده شد. ماتریس درهم ریختگی یک ماتریس مربعی N×N می‌باشد که N نشان‌دهنده تعداد دسته‌ها است و عناصر روی قطر اصلی نمونه‌های درست را نشان می‌دهند. از این دیدگاه برای به‌دست آوردن کارآیی یک دسته‌بند کافی است مجموع درایه‌های قطر اصلی این ماتریس را بر مجموع کل درایه‌های آن تقسیم نمود (Stehman, 1997). همین معیار در ارزیابی عملکرد در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج کالیبراسیون تصاویر استریو به‌کار رفته در این مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است که شامل پارامترهای داخلی و خارجی دوربین استریو می‌باشند. شاخص مهم در بین پارامترهای داخلی دوربین، میانگین خطای پس‌افکنش[2] است که مقدار آن برای دوربین اول و دوم به‌ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۵۹ پیکسل به‌دست آمد که کمتر از یک پیکسل می‌باشد. این میزان از خطا برای برآورد پارمترهای مربوط به دوربین استریو قابل قبول بوده و برای ایجاد مدل ابر نقطه‌ای و بازسازی سه‌بعدی تصویر مناسب است که با گزارش (Hartley and Zisserman, 2003) نیز همخوانی دارد. پارامترهای خارجی دوربین نیز بردار دوران و انتقال می‌باشند که برای محاسبه ماتریس بنیانی[3] و تعیین موقعیت دوربین و نهایتاً ایجاد مدل ابر نقطه‌ای لازم می‌باشند. برای این، دوربین سمت چپ به‌عنوان شاخص مبنا در نظر گرفته شده و مقادیر این بردارها برای دوربین دوم (سمت راست) نسبت به دوربین اول سنجیده شده‌اند.

شکل ۴ مدل سه‌بعدی متناظر یک زوج تصویر استریو (شکل ۳) را پس از اعمال بافت طبیعی خود تصویر اولیه (محیط خاک) را نشان

1- Linear discriminant analysis model

2- Reprojection error

3- Fundamental matrix

می‌دهد. در این مدل تمامی المآن‌های تصویر در سه راستای طول، عرض و ارتفاع دارای مقدار هستند.

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون و تخمین پارامترهای داخلی دوربین استریو

Table 2- Results of calibration and estimation of intrinsic parameters of the stereo camera.

پارامترهای داخلی Intrinsic parameters		
	دوربین ۱ Camera 1	دوربین ۲ Camera 2
فاصله کانونی Focal length (pixels)	[8.5297, 8.8535]	[8.5284, 8.8532]
نقطه اساسی Principle point (pixels)	[7.5779, 10.4512]	[7.5795, 10.4479]
میزان انحراف Skew value	[0.9078]	[0.9016]
اعوجاج شعاعی Radial distortion	[0.0167, 0.4256]	[0.0167, 0.4282]
اعوجاج مماسی Tangential distortion	$[6.8429e-04, 5.8236e-04]$	$[6.8319e-04,5.8092e-04]$

جدول ۳- پارامترهای خارجی دوربین استریو

Table 3- Extrinsic parameters of the stereo camera

بردار انتقال و دوران دوربین سمت راست نسبت به دوربین چپ Translation and rotation vector of camera 2 in relation to camera 1.	
بردار دوران Rotation vector	$[0.0030, 0.0022, 1.6701e-04]$
بردار انتقال Translation vector (mm)	[0.0948, 0.0861, 0.9228]



شکل ٤- یک نمونه از مدل سه‌بعدی حاصل از تصویر استریو از کلوخه‌های حاصل از شخم

Fig.4. A sample of 3D model obtained from stereo image of clods of a tilled soil

به‌منظور سنجش میزان دقت طبقه‌بندی کلوخه‌ها با روش بینایی استریو از ماتریس درهم ریختگی[1] استفاده شد. جدول ۴ نتایج طبقه‌بندی شش کلاس مختلف از کلوخه‌ها را نشان می‌دهد. دقت کلی طبقه‌بندی کلوخه‌ها برابر ۸۳/۷٪ به‌دست آمد. چنانچه مشاهده می‌شود بالاترین میزان دقت طبقه‌بندی مربوط به کلاس ششم (بزرگ‌ترین کلوخه‌ها) و برابر ۹۶/۲٪ و نیز کمترین دقت مربوط به کلاس اول با ۶۳/۵٪ (کوچک‌ترین کلوخه‌ها) به‌دست آمد. می‌توان این‌گونه استنباط نمود که با توجه به اندازه بسیار کوچک کلوخه‌های مربوط به کلاس اول (و تا حدودی کلاس دوم)، مؤلفه سوم یعنی

1- Confusion matrix

ارتفاع آن‌ها در تصویر ناچیز بوده و از تمایز معنی‌داری نسبت به بقیه کلاس‌ها در فرآیند طبقه‌بندی برخوردار نیستند. به عبارت دیگر مقدار اختلاف ارتفاع کلوخه‌های کلاس اول و دوم از سطح زمین ناچیز بوده و به همین جهت میزان دقت برای این دو کلاس در مقایسه با کلوخه‌های بزرگ‌تر سایر کلاس‌ها کمتر می‌باشد و این با نتایج مطالعات مشابه در این زمینه همخوانی دارد (Vannier *et al.*, 2009). دلیل این رویداد به این برمی‌گردد که مقدار ناهموخوانی (اختلاف فاصله افقی نقاط متناظر در دو تصویر چپ و راست) که از روی آن و فاصله بین دوربین‌ها میزان عمق یا فاصله اجسام از دوربین سنجیده می‌شود با خود عمق رابطه عکس دارد؛ بنابراین در کلاس‌های اول و دوم که میزان ناهمخوانی به دلیل ریز بودن اندازه کلوخه‌ها ناچیز می‌باشد عمق چندان تغییر نکرده است. در نتیجه در سیستم بینایی استریو وضوح و دقت بالای عمق فقط برای کلاس‌هایی که اشیاء آن به لنز دوربین نزدیک‌تر هستند، به‌دست می‌آید (Bradski and Kaehler, 2008). از طرف دیگر بالاترین دقت طبقه‌بندی به بزرگترین کلوخه‌ها یعنی کلاس شش تعلق یافت. به دلیل مشابه، از آنجایی‌که اندازه کلوخه‌های این کلاس برای هر سه مؤلفه طول، عرض و ضخامت دارای مقادیر بزرگ‌تری هستند لذا در حالت تصویر سه‌بعدی نیز کلوخه‌ها با دقت و وضوح بیشتری بازسازی شدند. که این با درک بصری انسان از محیط و طبق این قاعده که اجسام بزرگ‌تر بهتر و رساتر دیده و تحلیل می‌شوند، نیز سازگاری دارد.

جدول ٤- مقادیر ماتریس درهم ریختگی برای طبقه‌بندی شش کلاس از کلوخه‌های حاصل از شخم به همراه دقت طبقه‌بندی برای هر کلاس
Table 4- Confusion matrix values for classification of soil clods obtained from tilth with precision values per each class

	کلاس‌های واقعی Actual classes						
تخمین زده شده Estimated classes	1	2	3	4	5	6	دقت Precision (٪)
1	33	18	1	0	0	0	63.5
2	8	41	3	0	0	0	78.8
3	0	3	44	4	1	0	84.6
4	0	0	1	46	5	0	88.5
5	0	0	0	4	47	1	90.4
6	0	0	0	0	2	50	96.2

نتیجه مهم دیگری که بسیار حائز اهمیت است این است که تعداد ویژگی که دسته‌بند مورد نظر از آن‌ها برای عمل دسته‌بندی استفاده می‌کند برابر ۳ که همان مقادیر طول، عرض و ارتفاع تمامی تصاویر در شش دسته می‌باشد، است و ویژگی‌ها یا نقاط کلیدی استخراج شده توسط الگوریتم SIFT صرفاً به منظور سه‌بعدی‌سازی تصویر استفاده گردیدند. به عبارت بهتر فضای دسته‌بندی یک فضای سه‌بعدی می‌باشد که بسیار ساده‌تر از فضاهای با ابعاد بسیار بالاتر رایج است، به‌طوری‌که کار کردن در یک فضای سه‌بعدی به مراتب ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از فضاهای چندبعدی است. برای چنین فضاهای پیچیده‌ای مدل‌های پیچیده‌ای نیز برای دسته‌بندی نیاز است. تأثیر این مورد که قابل مقایسه با مطالعه حاضر است، تحقیقی است که در این راستا انجام شده است (Rahimi-Ajdadi *et al.*, 20016) انجام دادند؛ جایی‌که برای طبقه‌بندی کلوخه‌ها از ۱۹ ویژگی انتخابی (ولو ویژگی‌های مناسب) استفاده شده بود. برای مدل‌سازی و طبقه‌بندی این فضای نوزده‌بعدی یک طبقه‌بند قدرتمند مانند شبکه عصبی کانولوشن که یک مدل عمیق می‌باشد نیاز است. این در حالی است که در پژوهش حاضر فقط از یک طبقه‌بندی خطی به‌منظور عمل طبقه‌بندی این شش کلاس موجود استفاده گردید.

با توجه به مطالعات قبلی که در آن‌ها مشکل هم‌پوشانی کلوخه‌ها یک چالش اساسی بود (Itoh *et al.*, 2008; Bogrekci and Godwin, 2007) که اغلب به محاسبه و تخمین توأم با انحراف اندازه کلوخه‌ها می‌شود، روش ارائه‌شده با بهبود دقت طبقه‌بندی حداقل به میزان ۱۰٪ این چالش را از میان برداشته است. زیرا مشکل هم‌پوشانی، امکان استفاده از دو شاخص طول و عرض اشیاء (در اینجا کلوخه‌ها) را تحت تأثیر قرار داده و عملکرد مدل‌های ارائه‌شده را پایین می‌آورد. اما با این حال، رهایی از وابستگی به این دو شاخص و استفاده از شاخص هندسی ارتفاع توانسته بر چالش فوق غلبه نموده و کارایی مدل ارائه شده را بهبود بخشد که این از جمله یافته‌های مهم این پژوهش می‌باشد. شایان ذکر است که یکی از چالش‌های تحقیق حاضر، انجام کالیبراسیون می‌باشد زیرا کالیبراسیون نامناسب منجر به نتایج غیر دقیقی می‌شود که از قابلیت اعتماد آن به‌طور معنی‌داری می‌کاهد. مضاف بر این کالیبراسیون تصاویر استریو زمان کل پردازش

را بالا می‌برد که بهتر است برای این چالش نیز راه‌کاری اندیشیده شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور طبقه‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی از پایه‌ای‌ترین ویژگی‌های هندسی شامل طول، عرض و ارتفاع مستخرج از مدل سه‌بعدی استفاده شد. این هدف از طریق بازسازی سه‌بعدی صحنه با روش بینایی دنبال شد. دقت کلی طبقه‌بندی با طبقه‌بند آنالیز تفکیک برابر ۸۳/۷٪ به‌دست آمد که حاکی از عملکرد قابل قبول این روش می‌باشد. یکی از نتایجی که از این پژوهش به‌دست آمد این بود که از بین سه مؤلفه (x, y, z) مربوط به تک‌تک کلوخه‌ها، بعد سوم یعنی ارتفاع (ضخامت) تأثیر معنی‌داری در تفکیک بین کلاس‌های مختلف کلوخه‌ها دارد زیرا دو مؤلفه اول (طول و عرض) کلوخه به دلیل همپوشانی بسیار زیاد کلوخه در تمامی دسته‌ها عملاً تأثیر چندانی در جداسازی دسته‌های مختلف ندارد؛ این بدین معنی است که دقت بازسازی سه‌بعدی تصاویر کلوخه‌ها اثر مستقیم در دقت مدل طبقه‌بند دارد. بنابراین، اهمیت سه‌بعدی‌سازی تصویر از طریق بینایی استریو بیش از پیش مشهود است. به‌طور کلی نتایج شاخص به‌دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

۱- بهبود دقت طبقه‌بندی به میزان حداقل ۱۰٪ نسبت به مطالعات مشابه در دسته‌بندی کلوخه‌های حاصل از عملیات خاک‌ورزی.

۲- تخمین ارتفاع کلوخه‌ها و استفاده از آن در جداسازی دسته‌های مختلف از یکدیگر.

۳- در اختیار داشتن ابعاد کامل کلوخه‌ها در دستگاه مختصات کارتزین.

۴- حل چالش هم‌پوشانی کلوخه‌ها از طریق تأکید بر محاسبه بعد سوم یعنی ارتفاع به جای طول و عرض که اغلب به دلیل اتصال کلوخه‌ها به همدیگر اندازه کلوخه‌ها به‌صورت غیرواقعی و بزرگ‌تر از مقدار درست آن‌ها تخمین زده می‌شود.

References

1. Abbaspour-Gilandeh, Y., and R. Sedghi. 2015. Predicting soil fragmentation during tillage operation using fuzzy logic approach. Journal of Terramechanics 57: 61-69.
2. Bogrekci, I., and R. J. Godwin. 2007. Development of an image processing technique for soil tilth sensing. Biosystems Engineering 97: 323-331.
3. Bradski, G., and A. Kaehler. 2008. Learning OPenCV: computer vision with the OpenCV library. O'Reilly Media, Inc. USA.
4. Chepil, W. S., and F. Bisal. 1943. A rotary sieve method for determining the size distribution of soil clods. Soil Science 56: 95-100.
5. Chimi-Chiadjeu, O., E. Vannier, R. Dusseaux, and O. Taconet. 2011. Influence of Gradient Estimation on Clod Identification on a Seedbed Digital Elevation Model. Environmental & Engineering Geoscience 4: 337-352.
6. Chimi-Chiadjeu, O., S. Le Hégarat-Mascle, E. Vannier, O. Taconet, and R. Dusséaux. 2014. Automatic clod detection and boundary estimation from Digital Elevation Model images using different approaches. Catena 118: 73-83.
7. Czachor, H., and J. Lipiec. 2004. Quantification of soil macroporosity with image analysis. Int. Agrophys 18: 217-223.
8. Faraji-Mahyari, Z., and Sh. Rafiee. 2016. Principles of stereo vision and its applications in automated farming operations. National Conference on Research Findings in Natural and Agricultural Ecosystems Tehran, Iran. (In Farsi).
9. Gardel_Kurka, P. R., and A. A. Diaz-Salazar. 2019. Applications of image processing in robotics and instrumentation. Mechanical Systems and Signal Processing 124: 142-169.
10. Gilliot, J. M., E. Vaudour, and J. Michelin. 2017. Soil surface roughness measurement: A new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. Computers and Electronics in Agriculture 134: 63-78.
11. Hartley, R., and A. Zisserman. 2003. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press. New York, USA.
12. Itoh, H., K. Matsuo, A. Oida, H. Nakashima, J. Miyasaka, and T. Izumi. 2008. Aggregate size measurement by machine vision. Journal of Terramechanics 45:137-145.
13. Jafari-Malekabadi, A., M. Khojastehpour, and B. Emadi. 2019. Disparity map computation of tree stereo vision system and effect of canopy shapes and foliage density. Computers and Electronics in Agriculture 156: 627-644.
14. Kemper, W. D., and W. S. Chepil. 1965. Size distribution of aggregates. In C. A. Black et al. (ed). Methods of soil analysis, Part 1. Agronomy 9: 499- 510.
15. Kemper, W. D., T. J. Trout, M. J. Brown, and R. C. Rosenau. 1985b. Furrow erosion and water and soil management. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering 28: 1564- 1572.
16. Kise, M., Q. Zhang, and F. Rovira Mas. 2005. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. Biosystems Engineering 90 (4): 357-367.

17. Lindeberg, T. 1994. Scale-space theory: a basic tool for analyzing structures at different scales. Journal of Applied Statistics 21 (2): 224-270.
18. Loop, C., and Z. Zhang. 1999. Computing rectifying homographies for stereo vision. IEEE, CVPR 125-131.
19. Lowe, D. G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision 60 (2): 91-110.
20. Lyles, L., J. D. Dickerson, and L. A. Disrud. 1970. Modified rotary sieve for improved accuracy. Soil Science 109: 207-210.
21. Nasr, H. M., and F. Selles. 1995. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. Soil & Tillage research 34: 61-76.
22. Nasiri, A., H. Mobli, S. Hosseinpour, and Sh. Rafiee. 2017. Creation greenhouse environment map using localization of edge of cultivation platforms based on stereo vision. Journal of Agricultural Machinery 7 (2): 336-349. (In Farsi).
23. Neal-Smith, L., W. Zhang, F. M. Hansen, I. John-Hales, and M. Lionel-Smith. 2018. Innovative 3D and 2D machine vision methods for analysis of plants and crops in the field. Computers in Industry 97: 122-131.
24. Piers, L. F., J. A. Rosa, and L. C. Timm. 2011. Comparison of methods to evaluate soil bulk density. Acta Science. Agron 33 (1): 161-170.
25. Rahimi-Ajdadi, F., Y. Abbaspour-Gilandeh, K. Mollazade, and R. Hasanzadeh-Pakrezaie. 2016. Application of machine vision for classification of soil aggregate size. Soil & Tillage Research 162: 8-17.
26. Riegler, T., C. Rechberger, F. Handler, and H. Prankl. 2014. Image processing system for evaluation of tillage quality. Landtechnik 69: 125-131.
27. Sandri, R., T. Anken, T. Hilfiker, L. Sartori, and H. Bollhalder. 1998. Comparison of methods for determining cloddiness in seedbed preparation. Soil & Tillage Research 45: 75-90.
28. Sankowski, W., M. Wlodarczyk, D. Kacperski, and K. Grabowski. 2017. Estimation of measurement uncertainty in stereo vision system. Image and Vision Computing 61: 70-81.
29. Stafford, J. V., and B. Amber. 1990. Computer vision as a sensing system for soil cultivator control. Proceedings of ImecE, C419/0441 123-129.
30. Stehman, S. V. 1997. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. Remote Sensing of Environment 62: 77- 89.
31. Taconet, O., and V. Ciarletti. 2007. Estimating soil roughness indices on a ridge-and furrow surface using stereo photogrammetry. Soil & Tillage Research 93: 64-76.
32. Taconet, O., R. Dusséaux, E. Vannier, and O. Chimi-Chiadjeu. 2013. Statistical description of seedbed cloddiness by structuring objects using digital elevation models. Computers & Geosciences 60:117-125.
33. Thmosen, L. M., J. E. M. Baartman, R. J. Barneveld, T. Starkloff, and J. Stolte. 2015. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. Soil Journal 1: 399-410.
34. Trucco, E., and A. Verri.1998. Introductory techniques for 3-D computer vision. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
35. Van Bavel, C. H. M. 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. Soil Science Society of America Journal 14: 20-23.
36. Vannier, E., V. Ciarletti, and F. Darboux. 2009. Wavelet-based detection of clods on a soil surface. Computers & Geosciences 35: 2259-2267.
37. Vannier, E., O. Taconet, R. Dusséaux, and F. Darboux. 2018. A study of clod evolution in simulated rain on the basis of digital elevation models. Catena 160: 212-221.
38. Zhang, X., and W. Dahu. 2019. Application of artificial intelligence algorithms in image processing. Journal of Visual Communication and Image Representation 61: 42-49.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 155-167

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۱۶۷-۱۵۵

A Modern Approach for Classification of Soil Aggregates based on Stereo Vision

A. Azizi[1], Y. Abbaspour-Gilandeh[2*], T. Mesri Gundoshmian[3], H. Abrishami Moghaddam[4]

Received: 11-09-2019
Accepted: 29-12-2019

Introduction

Stereo vision is an approach to 3D information from multiple 2D views of a scene. The 3D information can be extracted from a pair image, as known stereo pair by estimating the relative depth of points in the scene.

Soil aggregate size distribution is one of the most important issues in the agriculture sector which highly affects energy consumed for preparing the field before planting. Mean weight diameter of clods is a standard metric for determining clod (big aggregates) size. Conventional methods are based on sieving soil samples to calculate the MWD. However, they are faced with several challenges in larger scales and practical applications. Furthermore, due to inherent limitations of soil environment and also being a tedious work, traditional methods would beuse to estimate the metric higher or lower than actual value.

As new methods, researchers are using computer vision techniques as virtual sieve so that the size of clods can be determined via processing digital images which have been taken from soil surface. Although, image-based methods have solved many of previous problems, their accuracy is not so high due to the complexity of soil environment and overlapping colds, and needs to be improved. In order to overcome the mentioned challenges, in the current study stereo vision method was developed so that it is possible to extract the third dimension information as height of clods which helps us to categorize clods into their own class.

Materials and Methods

In this study, the W3-Fujifilm stereo camera equipped with two 10-megapixel CCD sensors for both left and right lenses, and baseline spacing of 7.5 cm was used. The distance between the camera lens and the ground was also set to 60 cm.

In order to get three components of soil clods including (x, y, z), point cloud was investigated. For this, local features were extracted using a SIFT feature detector. The SIFT algorithm is robust against scale, rotation and illumination changes, so that these specifications have made it as a strong tool in the field of stereo vision. Then, the extracted features (keypoints) were matched between two stereo pair images by means of Brute Force algorithm and the location of all corresponding points were determined and point cloud was obtained.

At the final stage, three features including length, width and height of all six classes of soil clods were entered into a linear classifier entitled discriminant analysis. This classifier as a linear separator classified these six classes based on appropriate functions in a 5 dimensional space.

Results and Discussion

Results of classification model showed that the height (thickness) of clods have more distinguishing different soil clods. The reason for this refers to the event of overlapping, because most of clods were touched each other after sieving. Consequently, the length and width of clods had not significant effect in soil aggregates classification.

In order to analysis the result of soil aggregate classification, confusion matrix was calculated and the overall classification accuracy was achieved 83.7%. The lowest and highest accuracy were obtained for class 1 (the littlest class) and class 6 (the biggest class), respectively due to their low and high height from the soil surface.

Conclusions

In this research, the basic geometrical features including length, width and height were extracted from stereo pair digital images via stereo vision techniques to classify six classes of soil clods. This aim was reached by 3-D reconstruction of image data, so that the height of each image as the third component of (x,y,z) was obtained as well as the length and width. The results of classification indicated that the stereo vision technique had the

1- PhD Candidate, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4- Professor, Department of Biomedical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: abbaspour@uma.ac.ir)

satisfactory performance in determining the aggregate size distribution which is one of the most important indices for tilled soil quality.

Keywords: Mean Weight Diameter, Soil clod, Stereo vision, Tillage